

SIMULACIÓN Y COMPROBACIÓN DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN DE UN MCF (PCM) EN UN CILINDRO.

Manuel Domínguez ; Carmen García; Fernando González ; José. M^a Arias. Instituto del Frío .CISC.
C/ Antonio Novais nº 10. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid . España dominguez@if.csic.es

Resumen

Se estudia la transmisión de calor en un vaso cilíndrico conteniendo un MCF, con un sistema de cálculo de analogía eléctrica resuelta con ordenador. Los resultados se comparan con medidas experimentales.

Se considera que el sistema de cálculo empleado, es apropiado para la simulación de los problemas de transmisión de calor incluido el cambio de fase, con las suposiciones y condicionantes realizadas.

Palabras clave: materiales de cambio de fase, transmisión de calor, pentadecano, cilindro, cambio de fase, MCF y PCM.

INTRODUCCIÓN

La transmisión de calor incluido los cambios de fase, es compleja y poco estudiada a pesar de su interés en muchos casos. Tal como, el tiempo de carga o descarga de unos tanques cilíndricos conteniendo un MCF (Material de Cambio de Fase) con serpentines espirales, por donde circula el agua. Un nueva tecnología de simulación de la transmisión de calor realizada con la analogía eléctrica resuelta con ordenador la habíamos presentado y discutido Dominguez(1995) y demostrado que era precisa en Barragán (2000)) y que discretizando el espacio de forma variable en cada iteración, también lo era en la congelación del agua Barragán (2002) y Dominguez (2002), correspondiente a un caso que tenía solución teórica.

Se pensó hacer un experimento para su comprobación en un vaso alto, lleno de agua, aislado en sus dos extremos, introduciéndolo en un baño termostatado. Dadas las pegs experimentales encontradas, que se han discutido en Dominguez (2008) , se ha pensado utilizar en lugar del agua un material cuyas características o propiedades térmicas también son bien conocidas Espinosa (2001), Vlassov (2002), pero no tiene un problema de cristalización compleja como el del agua, el pentadecano.

El objetivo de éste trabajo es, describir la experiencia realizada. el sistemas de cálculo empleado, indicar los resultados obtenidos y discutir los resultados.

PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL

Se partió de un vaso de plástico transparente de diámetro interior 55 mm y espesor de la pared 1 mm y de altura 200 mm , el volumen de las muestras de ensayo fue de 150 cm³ . Para conseguir que la transmisión de calor fuese lo más radial posible, se aisló térmicamente la base y la zona superior, con poliestireno extrusionado de espesor 50 mm. Ver figura nº 1. El enfriamiento y calentamiento se realizo en un baño termostatado marca Haake, modelo F4 , de capacidad 4 litros. Siendo el fluido Siloil de la marca Huber M20.235.20

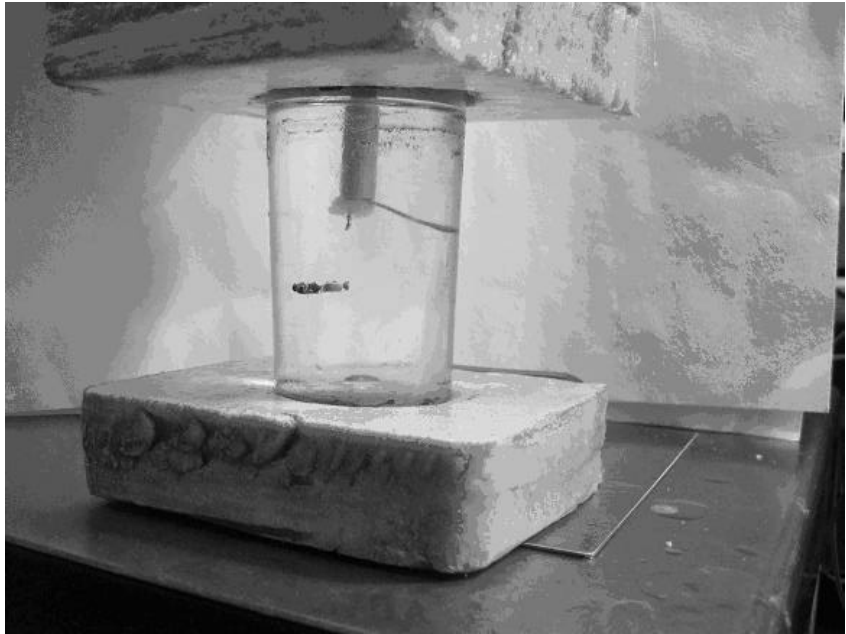


Figura nº 1. Vista del sistema experimental, un vaso aislado por ambos extremos

En la tabla nº 1 se recogen las propiedades termofísicas del producto ensayado.

Tabla nº 1 Propiedades termofísicas del MCF (PCM) ensayado

Producto		Pentadecano
Pureza	%	98
Densidad	Kg/m ³	751
Temperatura C.F.	°C	10
Calor L. Fusión	Kj/kg	206
Conductividad térmica		
Líquido	w/m.K	0,15
Sólido	w/m.K	0,182
Calor específico		
Líquido	J/Kg.K	2200
Sólido	J/Kg.K	1710

Se colocaron dos termopares de tipo T , a media altura del vaso , por el interior en la superficie y en el centro. Se registraron las temperaturas cada 5 segundos durante el enfriamiento y el calentamiento, mediante el equipo de adquisición de datos Yokohama, modelo MW100, guardándose los resultados en una hoja de cálculo Excel . Se realizaron tres enfriamientos y tres calentamientos con saltos teóricos entre el baño y el MCF de: 5, 10 y 15 °C, es decir, el baño se programó a : 5, 0, -5 , 15, 20 y 25 °C . (La temperatura media del MCF era de 10 °C.). También se hizo otro de salto 2°C con el baño a 12 °C, para alargar el tiempo del cambio de fase.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En las figuras nº 2 , 3 se han recogido las curvas obtenidas de dos calentamientos y en la nº 3 de un enfriamiento. Del termopar del centro y de uno introducido en el baño termostático.

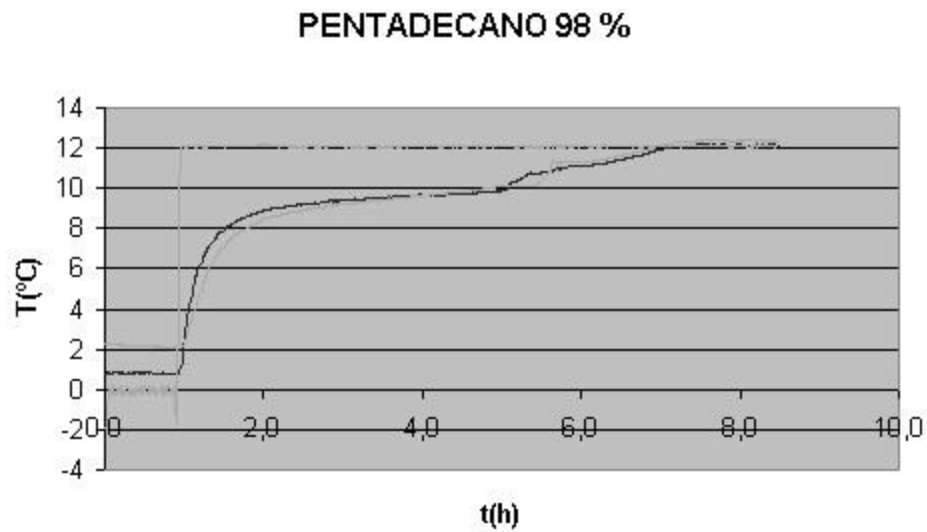


Figura nº 2 Curvas de variación de la temperatura en función del tiempo descongelando al MCF de 10 °C con el baño a 12 °C

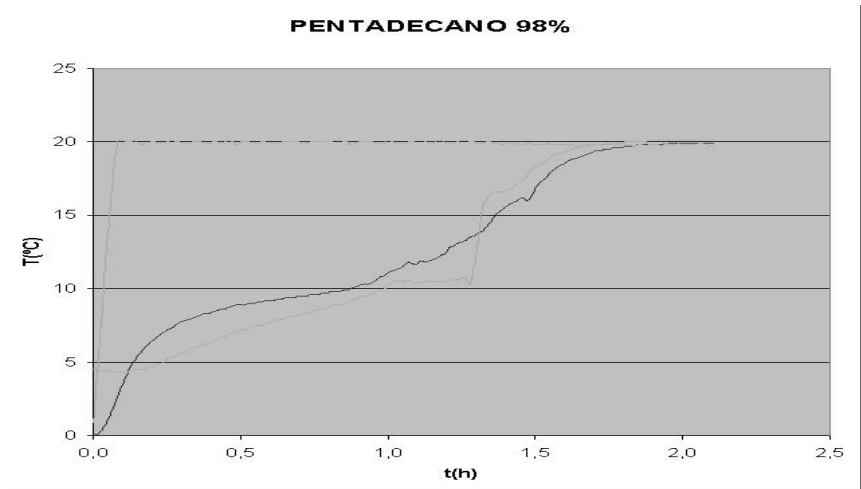


Figura nº 3 Curvas de variación de la temperatura en función del tiempo descongelando al MCF de 10 °C con el baño a 20 °C

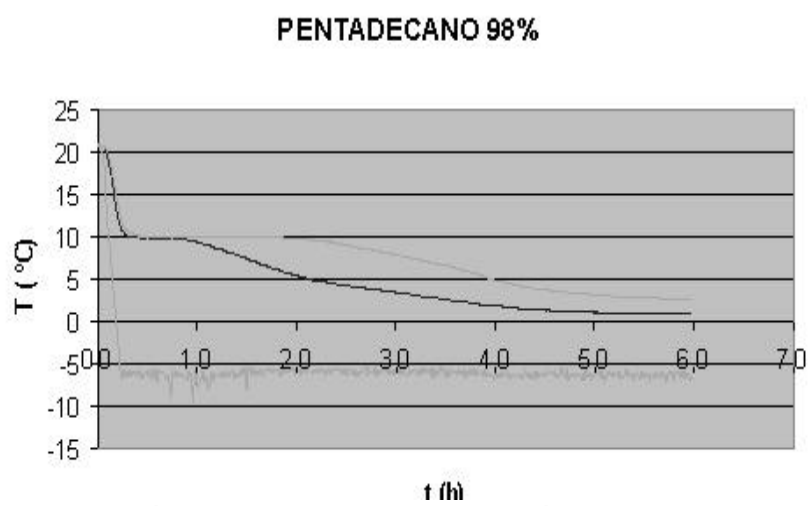


Figura nº 4 Curvas de variación de la temperatura en función del tiempo congelando al MCF de 10 °C con el baño a 0 °C

SIMULACIÓN CON LA ANALOGÍA ELÉCTRICA RESUELTA CON ORDENADOR

En la figura nº 5 se puede ver la discretización realizada y en la nº 6 el símil eléctrico empleado.

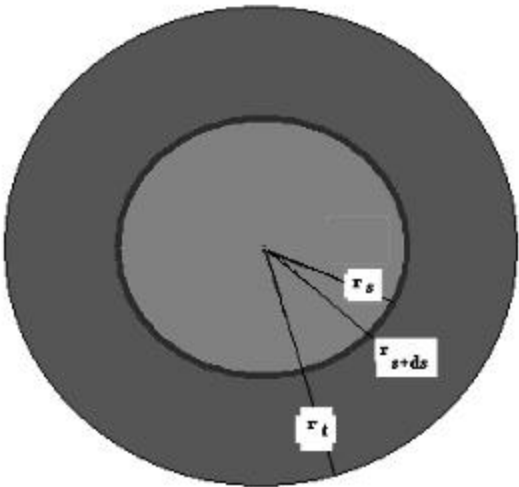


Figura nº 5 Esquema de la corona circular donde se indican las tres zonas , sólida, líquida y de cambio de fase.

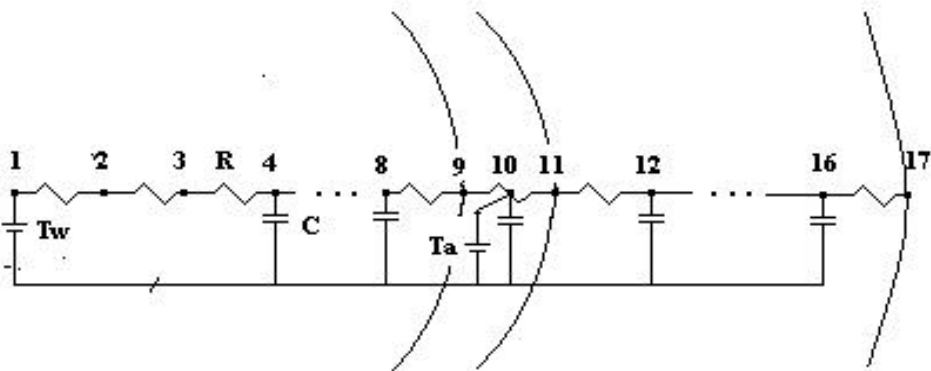


Figura nº 6 Esquema del símil eléctrico realizado en la simulación

En el cálculo se ha dividió en 50 partes cada zona de ambas fases y se calculó en cada iteracción, el espesor de la zona que cambia de fase **ds**, mediante la ecuación (1). Los espesores de ambas fases, se obtienen en cada iteracción sumando y restando respectivamente , dicho espesor.

ds = (Y_{ent}-Y_{sal})*dt / (p*(D_s)* u_l *r* L) (1)

En la zona de interfase se le impone durante el cambio de fase la condición de que su temperatura es la de dicho cambio de fase.

Las resistencias se calculan mediante la conocida ecuación

R=dr/(l .S) (2)

Y las capacidades por la también conocida ecuación

C=c.dr.S. r? (3)?

Calculándose las resistencias capacitivas o en derivación , mediante la ecuación

$$R_c=dt/(2.C) \quad (4)$$

La resistencia de película se calculan, como en todos los problemas térmicos, mediante la ecuación.

$$R= 1/(h.S) \quad (5)$$

Se recuerda, que en la analogía eléctrica , a la temperatura le corresponde la tensión, al flujo de calor, la intensidad, a las resistencias térmicas, las resistencias eléctricas y a las capacidades térmicas, también las capacidades eléctricas. En el caso indicado, como hay simetría axial, la malla eléctrica es sencilla y fácil de calcular . Se han empleado para resolver el problema, las conocidas leyes de **Kirchoff** , que equivale a resolver un problema de “n” ecuaciones, con “n” incógnitas. El programa se ha realizado en Visual Basic y los resultados se recogen en una hoja Excel.

RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE SIMULACIÓN DE LA ANALOGÍA ELÉCTRICA.

En las figuras nº 7, 8 se han recogido los resultados obtenidos para dos calentamientos , los correspondientes a los experimentales indicados en las figuras 2, 3. y en la nº 9 a un enfriamiento el correspondiente a la figura nº 4

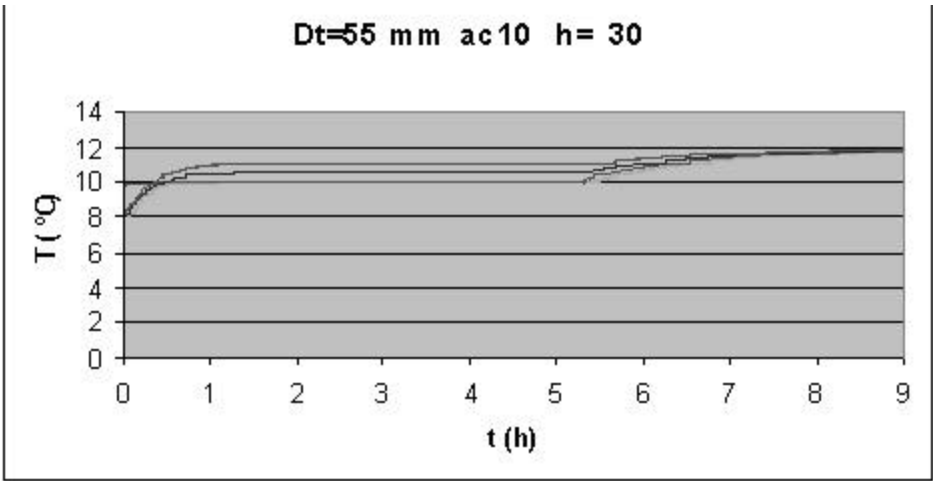


Figura nº 7 Curvas de variación de la temperatura en función del tiempo descongelando al MCF de 10 °C con el baño a 12 °C, obtenidas por simulación.

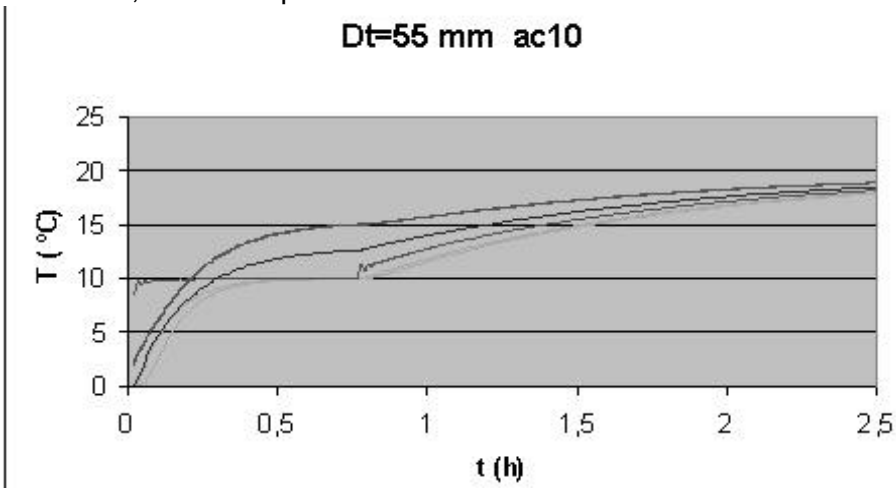


Figura nº 8 Curvas de variación de la temperatura en función del tiempo descongelando al MCF de 10 °C con el baño a 20 °C, obtenidas por simulación.

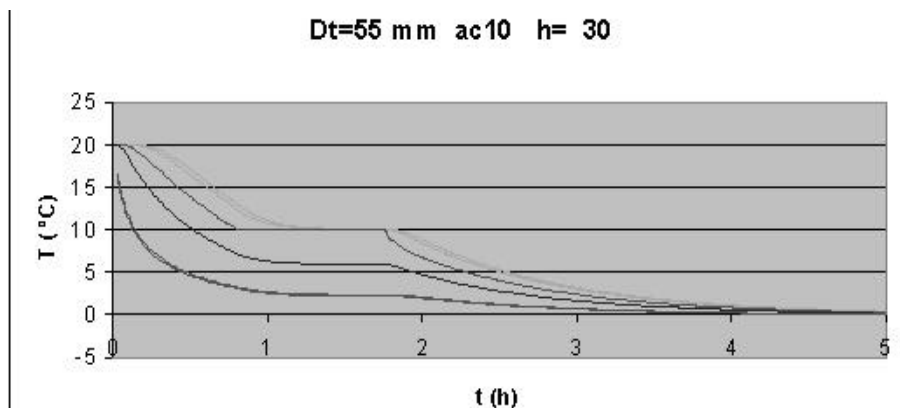


Figura nº 9 Curvas de variación de la temperatura en función del tiempo congelando al MCF de 10 °C con el baño a 0 °C

DISCUSIÓN.

En la tabla nº 2 se han recogido los tiempos en horas de carga y descarga para los tres saltos de temperaturas indicados.

Tabla nº 2 Comparación de los tiempos en horas que se han obtenido experimentalmente y por simulación en la descongelación y congelación del MCF estudiado

	Salto °C	Experimental	Analogia
Carga	5	2	3
	10	1	1,5
	15	0,8	1
Descarga	5	1,6	1,6
	10	1,05	1,1
	15	1,2	1

Se ha visto que el coeficiente de película del baño tiene gran importancia, depende del agitador del mismo y, del propio sistema de experimentación que se introduzca y de la variación de la viscosidad del líquido del baño con la temperatura. En la simulación realizada no se ha tenido presente dicha variación y se ha fijado en un valor intermedio de $30 \text{ w/m}^2\text{.K}$. Otro factor muy importante que se ha observado es la convección del calor dentro del vaso, que depender de las propiedades termofísicas y de viscosidad de la muestra y de las densidades en cada una de las fases.

Los tiempos de congelación depende por todo ello de los saltos de temperatura entre los líquidos externo y el interior, que se produzca la congelación o la descongelación. Los cambios bruscos que se observan en las figuras, en donde se han recogido los resultados experimentales, son debidos principalmente a lo indicado. Todos estos factores hace complejo la comparación precisa de los datos experimentales con los obtenidos por la simulación.

La concordancia entre los valores obtenidos, en el tiempo de carga y descarga, teniendo en cuenta las incertidumbres referidas, a nuestro juicio, comprueba que, el método de simulación con las suposiciones simplificadoras realizadas, es adecuado para resolver estos problemas.

El método de simulación de la analogía eléctrica resuelta con ordenador, con la suposición básica realizada (que se emplea en el análisis de circuitos eléctricos), junto a la discretización variable del espacio e imponiendo la temperatura de cambio de fase en el frente de éste, se había demostrado que conducía a buenos resultados, en un caso estudiado de solución analítica, la transmisión

plana, y ahora en este trabajo, se ha visto que con otra geometría más compleja, la cilíndrica, también concuerda con la experiencia realizada.

CONCLUSIONES

El sistema de cálculo empleado, ha conducido en el caso estudiado, a valores parecidos, lo que hace suponer que es adecuado para la resolución de los problemas de transmisión de calor incluido el cambio de fase.

Se considera, que la acumulación de calor, aprovechando los cambios de fase es muy interesante y cada vez se empleara más. Estudios como el realizado, pueden acortar los tiempos de desarrollo y optimación de nuevos sistemas. También podrá emplearse para los estudios de congelación o descongelación de alimentos.

NOMENCLATURA

C Capacidad Eléctrica
 C_i Capacidad eléctrica correspondiente al elemento i
 c_l Calor específico de la fase líquida
 c_s Calor específico de la fase sólida
 D diámetro
 D_i diámetro interior del vaso
 D_e diámetro exterior del vaso
 dt el incremento de tiempo de cálculo
 dr incremento del radio
 h coeficiente superficial o de película
 h_{ev} coeficiente superficial exterior del vaso
 k_l coeficiente de conductividad térmica de la fase líquida
 k_s coeficiente de conductividad térmica de la fase sólida
 L calor latente del acumulador de cambio de fase
 m_a masa del acumulador
 m_{al} masa del acumulador por unidad de longitud
 R resistencia eléctrica
 R_i resistencia eléctrica del elemento i
 R_c resistencia eléctrica equivalente a una capacidad
 r radio
 r_s radio del frente de cambio de fase
 r_v radio del vaso
 s espesor de la capa del acumulador próxima a la pared del vaso (sólida o líquida)
 t tiempo
 T temperatura
 T_{cf} temperatura de cambio de fase del acumulador
 u_l unidad de longitud del vaso.(altura del acumulador)
 Y intensidad de la corriente eléctrica
 Y_{ent} intensidad de la corriente de entrada en la capa de congelación
 Y_{sal} intensidad de la corriente de salida en la capa de congelación
 ρ densidad
 ρ_l densidad de la fase líquida
 ρ_s densidad de la fase sólida

REFERENCIAS

Barragán V.M, Fuentes R., Domínguez M. and. Arias J.M, Testing the computer assisted solution of the electrical analogy in the temperature distribution on a square sheet with nonhomogeneous boundary conditions. *Anales de Física* 95 pp. 139–145. (2000).

Barragán V.M.; Arias J.M^a; Dominguez M; Garcia C. Testing the computer assisted solution of the electrical analogy in heat transfer processes with a phase change which has an analytical solution. *International journal of refrigeration IIF*. VOL 25 N° 5 Ag 2002.552-537 (2002)
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4R-466H8BW-4&_user=4225285&_coverDate=08%2F31%2F2002&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000048559&_version=1&_urlVersion=0&_userid=4225285&md5=a52304e301920cc2b699b516c9ac5a6b

Domínguez M; Pinillos JM; Arias J M; Lopez N. Computerized electrical simulation of freezing processes. *Proceedings of the XIX International Congress of Refrigeration*, Holland, 1995, pp. 45–51. (1995)

Domínguez M.; De Lorenzo S.; González F.; De Elvira C. ; Barragán M. ; Algunas posibilidades que presenta la analogía eléctrica resuelta con ordenador en el estudio de procesos de congelación. VIII encuentro del grupo especializado de termodinámica de las Reales Sociedades de Física y Química. 2002 junio. Jarandilla de la Vega (Cáceres, España) 47,48. (2002)

Dominguez M.: García C. ; Arias J.M^a. Dificultades experimentales encontradas al comprobar con agua, un sistema de cálculo del tiempo de congelación. IX. encuentro del grupo especializado de termodinámica de las Reales Sociedades de Física y Química. 2008 Sep. Jaca. (Huesca). (2008)

Espinosa S. T. Doctoral Procesamiento Supercrítico de Productos Naturales .Modelado, Análisis y Optimización (en línea) (2001)
<http://fain.uncoma.edu.ar/termodinamica/index/Tesis%20Susana%20Espinosa.pdf> acceso 8 abril 2008

Vlassov V; Muraoka I; Cândido P Investigações e desenvolvimento de capacitores térmicos com material de mudança de fase(PCM) (en línea) (2002)
http://www2.dem.inpe.br/valeri/2002_PCM_IEAv_rew_portug.pdf . acceso 8 abril 2008